

# 다목적 유전자 알고리즘을 이용한 아웃리거 댐퍼의 최적설계

## Optimal Design of Outrigger Damper using Multi-objective Genetic Algorithm

김 현 수\*                      윤 성 옥\*\*                      강 주 원\*\*\*  
Kim, Hyun-Su                  Yoon, Sung-Wook                  Kang, Joo-Won

### Abstract

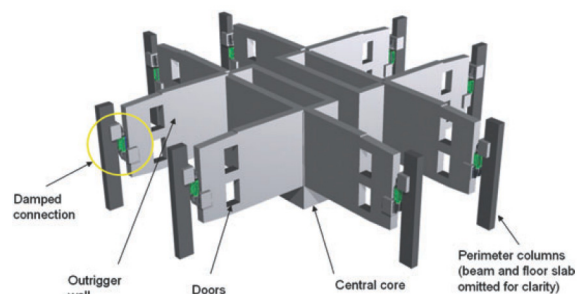
Recently, a concept of damped outrigger system has been proposed for tall buildings. Structural characteristics and design method of this system were not sufficiently investigated to date. In this study, control performance of damped outrigger system for building structures subjected to seismic excitations has been investigated. And optimal design method of damped outrigger system has been proposed using multi-objective genetic algorithm. To this end, a simplified numerical model of damped outrigger system has been developed. State-space equation formulation proposed in previous research was used to make a numerical model. Multi-objective genetic algorithms has been employed for optimal design of the stiffness and damping parameters of the outrigger damper. Based on numerical analyses, it has been shown that the damped outrigger system control dynamic responses of the tall buildings subjected to earthquake excitations in comparison with a traditional outrigger system.

*Keywords : Outrigger damper system, Seismic response control, Multi-objective genetic algorithms, Optimal design*

### 1. 서 론

아웃리거 구조시스템은 풍하중이나 지진하중을 받는 고층건물의 횡방향 강성을 증가시키기 위한 가장 경제적인 구조시스템으로 각광을 받고 있으며 2000년 이후에는 약 73%의 건물이 아웃리거 시스템을 적용하고 있는 것으로 조사되었다<sup>1)</sup>. 아웃리거 시스템이 적용된 대표적인 해외 건물로는 ICC (International Commerce Center, 490m, 118층), Jin Mao Tower(420.5m, 93층) 등이 있으며, 국내의 대표적인 초고층 건물인 목동 하이패리온(254m, 69층), 동북아 무역센터(305m, 68층)에도 아웃리거 시

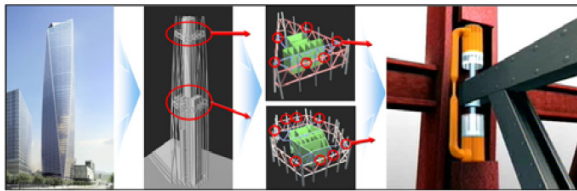
스템이 적용되었다<sup>2)</sup>. 아웃리거 시스템에 대한 기존의 연구는 주로 최적의 설치위치 등에 대한 내용이 주를 이루고 있다<sup>3)4)</sup>. 최근에는 전통적인 아웃리거 시스템에서 <Fig. 1>과 같이 외곽 기둥과 아웃리거 사이에 댐퍼를 설치하는 아웃리거 댐퍼시스템이 제안되어 고층건물의 풍응답 제어에 사용된 바 있다<sup>5)</sup>. 이 경우에는 풍진동을 제어하는데 매우 효과적이고 물량감소로 경제성도 우수하다고 평가되었다.



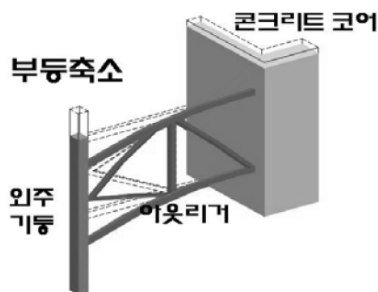
<Fig. 1> Concept of outrigger damper<sup>6)</sup>

\* 정회원, 선문대학교 건축학부 부교수  
Division of Architecture, Sunmoon University  
\*\* 정회원, 영남대학교 건축학부 석사과정  
School of Architecture, Yeungnam University  
\*\*\* 교신저자, 정회원, 영남대학교 건축학부 교수  
School of Architecture, Yeungnam University  
Tel: 053-810-2429 Fax: 053-810-4625  
E-mail : kangj@ynu.ac.kr

국내에서도 <Fig. 2>에 나타난 바와 같이 송도에 건설된 동북아무역센터(NEATT)에 아웃리저 댐퍼를 설치하여 사용한 바가 있다<sup>7)</sup>. 동북아무역센터는 지상 68층에 높이 305m로서 횡하중에 대한 저항성을 향상시키기 위하여 아웃리저 시스템을 사용하였는데 고층건물에 적용된 아웃리저 시스템에서는 <Fig. 3>에 나타난 바와 같이 코어 전단벽과 외곽기둥의 부등축소로 인해 아웃리저와 외곽기둥 접합부의 응력이 증가할 수 있다. 동북아무역센터에서는 이러한 응력의 흡수를 주목적으로 하여 아웃리저 댐퍼를 설치하였다.



<Fig. 2> Outrigger damper in NEATT<sup>7)</sup>



<Fig. 3> Differential column shortening in outrigger system

아웃리저 댐퍼시스템에 대한 연구는 전 세계적으로 아직 초기 단계에 있기 때문에 기존에 수행된 아웃리저 댐퍼시스템의 제어성능 분석이나 해석 및 설계와 관련된 연구는 많지 않다. 김병전 등<sup>1)</sup>은 건축물의 풍진동 제어를 위한 아웃리저 댐퍼시스템의 설계에 대한 연구를 위하여 강성과 감쇠가 복합적으로 거동하면서 발생하는 아웃리저 댐퍼시스템의 응답특성을 검토하였고 아웃리저 댐퍼의 최적위치와 적정용량을 찾기 위한 연구를 수행하였다. Chen 등<sup>8)</sup>은 아웃리저 댐퍼시스템이 설치된 고층건물의 해석기법을 제안하였고 이를 바탕으로 아웃리저 댐퍼의 최적설치위치 및 적정용량을 설계할 수 있는

디자인 커브를 제안하였다. 이 연구는 해석적 방법으로 접근하여 일반 엔지니어가 연구결과에 쉽게 접근할 수 있는 장점이 있지만 다양한 형태의 아웃리저 시스템에 적용하기에는 제한점이 존재한다.

기존의 전통적인 아웃리저 시스템은 동적응답이 구조물의 강성분포에만 의존한다. 또한 고층건물의 동적응답을 저감시키기 위하여 추가적인 감쇠를 사용한 기존의 댐퍼에 대한 연구는 감쇠만을 고려하면 되므로 비교적 명료하게 연구가 수행될 수 있었다. 그러나 아웃리저 댐퍼시스템은 강성과 감쇠가 복합적으로 거동하고 특히 아웃리저 댐퍼의 강성증가는 변위응답을 저감시킬 수 있지만 가속도응답은 오히려 증가시키는 등 쉽게 최적설계가 이루어지기 어렵다.

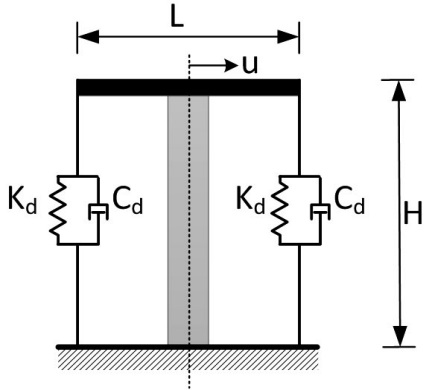
이러한 배경을 바탕으로 본 연구에서는 지진하중을 받는 고층건물을 대상으로 아웃리저 댐퍼시스템의 동적응답 저감성능을 검토하고 감쇠기의 최적 강성 및 감쇠값을 찾는 설계기법을 제안하고자 한다. 전술한 바와 같이 감쇠기 강성의 증감에 따라서 구조물의 동적변위 및 가속도응답이 서로 상반되는 경향을 나타내므로 하나의 최적설계값을 찾아내는 것은 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 전역 최적화에 적합한 것으로 알려진 다목적 유전자알고리즘을 사용하여 아웃리저 댐퍼의 강성 및 감쇠비에 대한 설계변수를 최적화하였다.

## 2. 수치해석모델

지진하중을 받는 고층건물에 대한 아웃리저 댐퍼시스템의 진동제어성능을 검토하고 최적설계방법을 개발하기 위해서 본 연구에서는 <Fig. 4>에 나타난 바와 같이 아웃리저 모델을 단순화한 축소모델을 사용하였다. 이 단순모델은 김병전 등<sup>1)</sup>의 연구에서 사용한 모델로 고층건물의 동적응답에 아웃리저 댐퍼시스템이 미치는 영향을 비교적 정확히 파악할 수 있는 장점을 가지고 있어서 매개변수 연구에 매우 효과적으로 활용될 수 있다.

이 모델에서는 수평하중에 대한 전단력은 전단벽에 의해서만 부담되고 전단벽 코어의 강성은 탄성계수(E), 단면2차모멘트(I) 및 전단벽의 높이(H)에

의해서 결정된다. 슬래브나 보에 비해서 아웃리거의 상대적인 강성이 매우 크므로 축소모델에서는 전단벽 코어와 외곽기둥을 연결하는 부재로 아웃리거 하나만으로 가정하였으며 길이는 L이고 강체로 모형화하였다.



<Fig. 4> Simplified outrigger damper model

외곽기둥부재의 수직방향 강성에 비하여 아웃리거 댐퍼의 강성은 상대적으로 매우 약하기 때문에 아웃리거 단부와 외곽기둥 연결부분의 강성은 아웃리거 댐퍼의 강성( $K_d$ )에 의해서 결정된다. 아웃리거 단부와 외곽기둥의 접합부에서 수직방향 변형이 가능한데 아웃리거 단부의 수직변형은 아웃리거의 회전각도( $\theta$ )에 의해 계산될 수 있다. <Fig. 4>에서 아웃리거 댐퍼의 감쇠는  $C_d$ 로 나타내었다.

선행 연구<sup>1)</sup>에 사용된 축소모델의 운동방정식을 본 연구에서 활용하였고 이 식은 다음과 같이 하중을 받는 아웃리거 댐퍼시스템의 수평변위( $u$ )와 아웃리거가 회전하는 각도( $\theta$ )로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \frac{12EI}{H^3} & \frac{6EI}{H^2} \\ \frac{6EI}{H^2} & \frac{4EI}{H} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \\ T \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, E는 전단벽 코어의 탄성계수, I는 단면2차 모멘트, H는 건물의 높이, f는 수평하중, T는 회전 모멘트이다. 식 (1)의 두 번째 행을 전개하면 회전모멘트 T는 다음의 식 (2)와 같이 표현된다.

$$T = \frac{6EI}{H^2}u + \frac{4EI}{H}\theta \quad (2)$$

이 회전모멘트는 아웃리거 단부에 설치된 댐퍼에 의한 모멘트  $T_d$ 와 같게 되며 식 (3)에 나타난 바와 같이 아웃리거 팔길이(L)와 회전변형( $\theta$ )으로 나타낼 수 있다.

$$T_d = -K_d \frac{L^2}{2}\theta - FL \quad (3)$$

여기서,  $K_d$ 는 외곽기둥의 강성이며, F는 아웃리거 댐퍼에 발생하는 감쇠력을 나타낸다. 본 연구에서는 점성감쇠기를 사용하므로  $F = C_d \times (L/2)\dot{\theta}$ 로 표현되며  $C_d$ 는 점성감쇠기의 용량을 나타낸다. 식 (2)의 T와 식 (3)의  $T_d$ 이 같다는 관계에 의해서 수평변위( $u$ )와 아웃리거 회전각( $\theta$ )의 관계를 식 (4)와 같이 나타낼 수 있고 이를 구조물의 운동방정식 식 (5)에 대입하면 아웃리거 회전각( $\theta$ )에 대한 상태방정식 식 (6)을 얻을 수 있다.

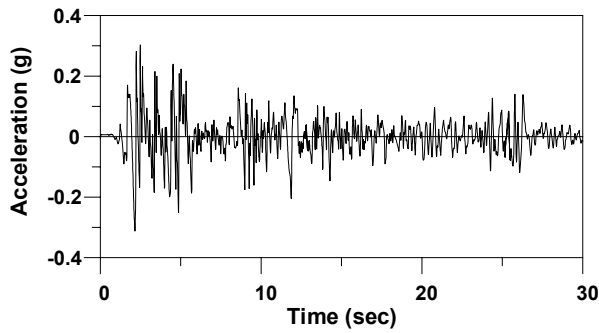
$$u = \left( -\frac{K_d H^2 L^2}{12EI} - \frac{2}{3}H \right) \theta - \frac{H^2 L}{6EI} F \quad (4)$$

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + \frac{6EI}{H^2}\theta = f \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{\left( \frac{12EI}{H^3} X_a + \frac{6EI}{H^2} \right)}{m X_a} & -\frac{c}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{m X_a} & \frac{2L}{m X_a H} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f \\ F \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서,  $X_a = \left( -\frac{K_d H^2 L^2}{12EI} - \frac{2}{3}H \right)$ 이다.

본 논문에서는 상기 상태방정식을 MATLAB 버전 R2011a와 SIMULINK를 사용하여 모형화하였다. 수치해석을 위하여 El Centro (1940, NS) 지진하중을 사용하였으며 <Fig. 5>에 지진하중의 시간이력 그래프를 나타내었다.



<Fig. 5> El Centro (1940) earthquake

### 3. 유전자알고리즘을 이용한 아웃리거 댐퍼시스템의 최적화

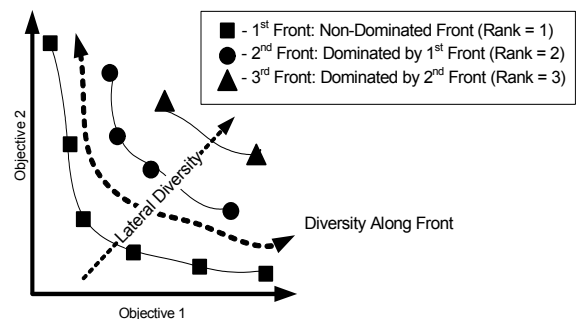
아웃리거 구조시스템이 적용된 고층건물에 풍하중과 지진하중 같은 동적 횡하중이 가해질 경우에 아웃리거 시스템 및 외곽기둥의 강성이 증가할수록 최상층의 최대변위는 일반적으로 감소하게 된다. 그러나 강성이 적정수준을 지나서 매우 커지게 되면 고층건물의 사용성에 큰 영향을 미치는 가속도응답은 오히려 증가하게 된다.<sup>1)</sup> 따라서 아웃리거 댐퍼의 강성증가는 구조물의 변위응답은 감소시킬 수 있지만 가속도응답은 증가하기 때문에 유일한 최적설계 값을 찾는 것은 불가능하다. 또한 아웃리거 댐퍼에 의해서 추가로 댐퍼의 감쇠력이 외곽기둥의 강성과 복합적으로 구조물의 거동에 영향을 미치게 된다면 아웃리거 최적설계는 더욱 어려워질 것이다. 따라서 본 연구에서는 다목적 유전자알고리즘을 사용하여 아웃리거 댐퍼시스템을 최적화하는 방법을 제안하였다.

대부분의 최적화알고리즘은 직렬적 검색방법을 사용하여 한 번에 한 방향으로만 탐색할 수 있는 것과 달리 유전자알고리즘은 개체군 안의 여러개의 개체들이 동시에 탐색공간을 다양한 방법으로 탐색할 수 있다<sup>9,10)</sup>. 구조공학분야의 최적화 문제들은 비선형 문제가 대부분이다. 한 요소의 변화가 전체 시스템에 주는 영향은 작을 지라도 여러 요소들이 함께 변화할 때 요소들의 조합이 전체 시스템에 주는 영향은 크게 된다. 유전자알고리즘의 병렬탐색 특성은 매우 방대한 적합도지형에서 셀 수 없이 많은 요소들의 조합이 있음에도 작은 부분만을 표본 삼아

서 짧은 시간안에 최적의 결과를 얻을 수 있게 해준다. 또한 많은 지역해(Local optimum)를 가진 복잡한 문제에 있어서 유전자알고리즘은 지역해에서 빠져나와 전역해(Global optimum)를 찾는 데 있어서 매우 효과적이라는 것이 증명된 알고리즘이다.

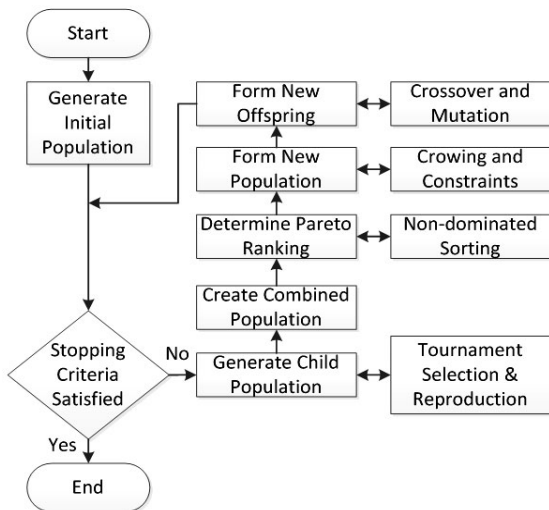
전술한 바와 같이 아웃리거 댐퍼시스템의 최적화 문제는 한 개의 목적함수를 최적화하는 것으로 표현되지 못하고 변위응답과 가속도응답사이에 상호교환(Trade-off) 성격을 가지고 있는 다목적 최적화로 표현될 수 있다. 유전자알고리즘은 이러한 다목적 최적화문제의 해결에 매우 효과적으로 특히 앞서 언급한 병렬탐색특성이 다목적함수 최적화에서 동등한 여러개의 해를 찾아낼 수 있게 한다.

본 연구에서는 아웃리거 댐퍼시스템의 최적설계를 위하여 다목적 유전자알고리즘의 기법 중 하나인 NSGA-II를 이용하였다. Deb 등<sup>10)</sup>에 의하여 제안된 NSGA-II는 다목적 최적화 문제를 풀기 위한 다목적 유전자알고리즘의 대표적 기법이다. 유전자알고리즘을 다목적 문제에 적용할 때, 모집단에서 생존할 개체를 어떻게 선택하느냐는 매우 중요한 문제이다. 또한 단일 목적 최적화 문제와 달리 다목적 문제는 여러 목적함수가 존재하므로 각 개체의 적응도를 어떤 기준에 의해 평가하느냐가 중요한 문제이다. NSGA-II 알고리즘은 기존의 NSGA 알고리즘의 단점을 보완한 기법으로, 비지배해 정렬방법의 복잡도가 감소하였으며, 군집거리(Crowding Distance)를 도입하여 각각의 자원을 보다 효율적으로 배분하도록 하였고, 현재 세대의 최적해를 다음 세대로 넘겨주는 엘리티즘이 적용되었다. NSGA-II가 다른 유전자 알고리즘과 구별되는 특징인 다양성 유지방법에 대해서 <Fig. 6>에 나타내었다.



<Fig. 6> Types of GA Diversity

NSGA-II를 이용한 최적화 과정을 <Fig. 7>에 나타내었다<sup>11,12</sup>. 그림에 나타낸 바와 같이 NSGA-II의 실행 단계는 첫 번째 단계로 초기 모집단을 선정하고 종료 조건을 만족하는지 판단한다. 종료 조건을 만족하지 않는 경우 토너먼트 선별(Tournament selection), 재생산(Reproduction) 등을 통해 자손집단을 생성하고, 모집단과 자손집단을 결합하여 새로운 집단을 생성한다. 그리고 Fast non-dominating sorting algorithm을 이용하여 비지배해를 정렬하고, 정렬된 비지배 프론트와 군집거리 계산을 통해 선별 과정이 이루어진다. 선별된 집단에 대하여 교차와 돌연변이를 통해 다음 세대로 진화할 모집단이 결정되고, 적합도 평가가 이루어진다. 위의 과정을 종료조건이 만족될 때까지 반복적으로 수행하게 된다.



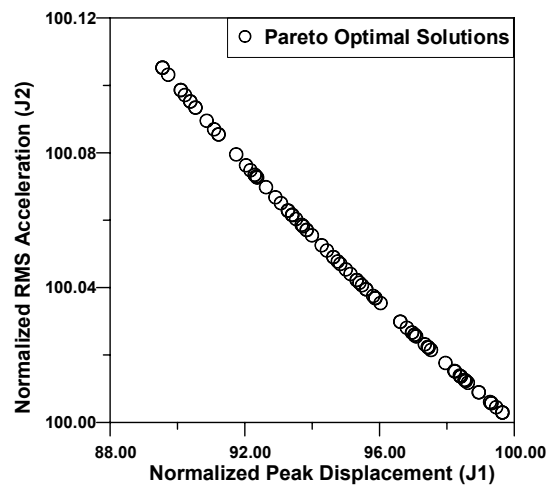
<Fig. 7> Optimization flowchart of NSGA-II

본 연구에서는 아웃리거 댐퍼의 강성( $K_d$ )과 감쇠( $C_d$ )를 설계변수로 하여 다목적 최적화를 수행하였다. 전술한 바와 같이 구조물의 변위응답과 가속도응답은 서로 상충하는 관계에 있기 때문에 최대치 변위응답(J1)과 RMS 가속도응답(J2)을 저감시키는 것을 최적화 목적으로 삼았다. 두 목적함수는 아웃리거 댐퍼가 설치된 경우의 응답을 설치되지 않았을 때의 응답으로 나누어 정규화된 비율(%)로 나타내었다. 따라서 목적함수의 값이 100보다 작을 때에는 해당 응답을 아웃리거 댐퍼가 효과적으로 제어

할 수 있음을 의미한다.

#### 4. 아웃리거 댐퍼의 지진응답 제어성능평가

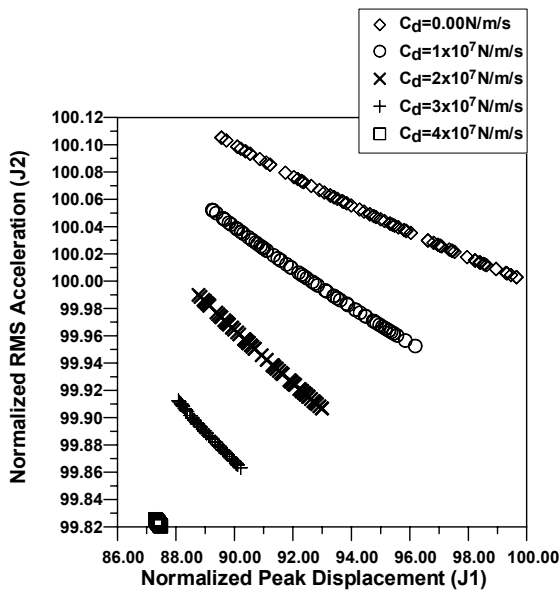
본 연구에서는 NSGA-II를 이용하여 아웃리거 댐퍼시스템을 최적화하고 지진응답 제어성능을 검토하여 보았다. 유전자알고리즘을 이용한 다목적 최적화작업에서 한 세대를 이루는 개체군은 100개로 구성하였으며 최적화는 500세대까지 수행하였다. 우선 아웃리거 댐퍼의 감쇠값을 '0'으로 두고 강성만을 변화시킨 최적화작업의 결과를 <Fig. 8>에 나타내었다.



<Fig. 8> Optimization with '0' damping

그림에서 확인할 수 있듯이 아웃리거 댐퍼의 강성이 변함에 따라서 변위응답 및 가속도응답은 서로 상반되는 경향을 나타낸다. 아웃리거 댐퍼의 강성이 증가하면 아웃리거와 외곽기둥과의 접합을 강하게 하여 구조물의 횡방향 강성이 증가하므로 변위응답이 줄어들게 된다. 그러나 변위응답과는 반대로 가속도응답은 증가하므로 모든 개체의 가속도 목적함수(J2)가 100보다 큰 것을 알 수 있다. 최적화 과정에서 아웃리거 댐퍼의 강성 용량 범위는 매개변수 연구를 통하여 강성의 변화에 따라서 구조물의 응답이 민감하게 반응하는 구간을 결정하였고 이는  $10^6$  N/m에서  $6 \times 10^7$  N/m의 범위를 가진다.

일반적으로 구조물에 추가되는 점성감쇠는 동적 변위응답 및 가속도응답을 동시에 줄일 수 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 너무 과도한 추가감쇠가 사용된다면 해석적으로 구조물의 동적응답을 줄일 수는 있지만 실제 구조물에 적용가능성은 부족하게 된다. 따라서 합리적이고 경제적인 댐퍼의 용량을 찾는 것이 중요하다. 다음의 <Fig. 9>에서는 아웃리거 댐퍼의 다양한 감쇠용량에 따른 구조물의 최적화 결과를 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 아웃리거 댐퍼의 점성감쇠값이 증가할수록 변위응답 및 가속도응답의 제어능력이 동시에 향상되는 것을 볼 수 있다. 또한 일정한 감쇠용량에 대하여 강성이 변함에 따라 변위응답 및 가속도응답의 저감효과가 반비례하게 나타나는 것을 볼 수 있는데 이러한 강성의 변화가 구조물의 응답변화에 미치는 영향은 감쇠용량이 증가할수록 작아지는 것을 알 수 있다.



<Fig. 9> Optimization with various damping constants

앞의 결과에서 아웃리거 댐퍼를 적절하게 설계하기 위해서는 댐퍼의 감쇠용량을 적절하게 결정하는 것이 중요한데 본 논문에서는 김병진 등<sup>1)</sup>이 제안한 구조물의 전도모멘트(M<sub>1</sub>)와 감쇠력으로 발생하는 회전모멘트(M<sub>2</sub>)를 매개로 표현하는 방법을 도입하여 제어성능을 분석하여 보았다. 전도모멘트(M<sub>1</sub>)는

다음의 식 (7)과 같이 구조물의 높이(h), 수평변위(H)와 전단벽 코어의 강성(K)으로 표현된다. 여기서 강성 K는 최대 밀면전단력을 최상층 최대변위로 나누어서 구한다.

$$M_1 = H \times u \times K \tag{7}$$

감쇠력으로 발생하는 회전모멘트(M<sub>2</sub>)를 나타내기 위해서 식 (2)의 회전모멘트(T)를 'θ'로 두면 회전각과 수평변위와의 관계를 식 (8)과 같이 나타낼 수 있고 회전각속도(θ̇)는 구조물의 고유 각진동수(ω)를 이용하여 식 (9)로 표현된다.

$$\theta = -\frac{3}{2H}u \tag{8}$$

$$\dot{\theta} = -\frac{3}{2H}\omega u \tag{9}$$

댐퍼가 운동하는 아웃리거 단부의 수직변위를 x로 놓으면 이에 대한 회전모멘트는 식 (10), (11)과 같다. 식 (11)에 식 (9)를 대입하여 수평변위(u)에 관한 회전모멘트로 정리하면 식 (12)와 같다.

$$M_2 = 2 \left( C_d \times \dot{x} \times \frac{L}{2} \right) \tag{10}$$

$$\dot{x} = \frac{L}{2} \dot{\theta} \tag{11}$$

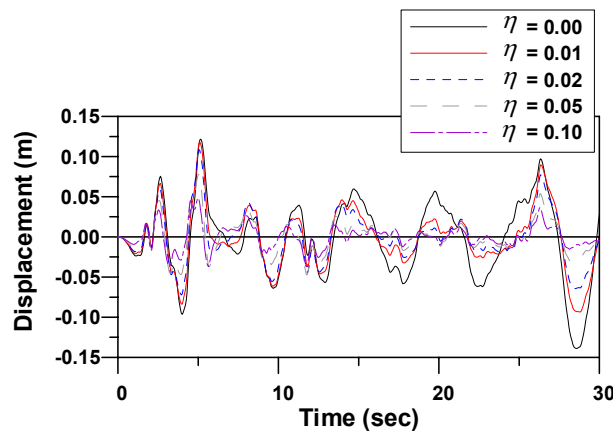
$$M_2 = -C_d \frac{3L^2}{4H} \omega u \tag{12}$$

전도모멘트(M<sub>1</sub>)와 감쇠력으로 발생하는 회전모멘트(M<sub>2</sub>)의 비율을 모멘트비율(η)로 표현하면 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다. 반대로 미리 모멘트비율(η)이 결정된다면 아웃리거 댐퍼의 감쇠용량은 식 (14)로 표현될 수 있다.

$$\eta = \left| \frac{M_2}{M_1} \right| = \left| C_d \frac{3L^2}{4H^2 K} \omega \right| \tag{13}$$

$$C_d = \eta \frac{4H^2}{3L^2 \omega} K \tag{14}$$

모멘트비율( $\eta$ )에 따라서 아웃리거 댐퍼의 감쇠용량( $C_d$ )을 결정하고 이를 <Fig. 4>에 나타난 축소모델에 적용하였을 때 구조물의 응답이 변화하는 경향을 검토하기 위하여 시간이력해석을 수행하였으며 각 모멘트비율에 따른 변위응답 시간이력을 <Fig. 10>에 나타내었다.



<Fig. 10> Displacement time histories with various moment ratios

그림을 보면 모멘트비율의 값이 증가할수록, 즉 아웃리거 댐퍼의 감쇠용량이 증가할수록 변위응답이 크게 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 특히 지진 초기의 천이상태 응답보다 지진의 후반부에 발생하는 최대응답을 아웃리거 댐퍼가 매우 효과적으로 제어하는 것을 알 수 있다. <Fig. 10>에 나타난 변위시간이력 그래프에서는 각 모멘트비율에 따른 응답저감효과를 정성적으로 파악할 수 있었지만 정확한 저감비율을 검토할 수 없었다. 따라서 <Table 1>에 모멘트비율별 최대치 및 RMS 변위응답을 아웃리거 댐퍼가 없는 구조물에 대한 저감비율로 나타내어 정량적 성능검토를 해보았다.

<Table 1> Response reduction ratio

Moment ratio ( $\eta$ )	1%	2%	5%	10%
Peak response	85.0	78.1	56.1	35.1
RMS response	76.9	64.3	43.9	28.8

표에서 볼 수 있듯이 최대치 변위응답 및 RMS 변위응답이 모멘트비율의 증가에 따라서 큰 폭으로

줄어드는데 RMS 응답이 더 효과적으로 제어되는 것을 확인할 수 있다. 모멘트비율이 1%-2% 정도만 되어도 매우 큰 응답저감 효과를 볼 수 있고 5%가 되면 최대치 및 RMS 응답을 50% 내외로 줄일 수 있다. 이러한 응답저감 효과를 얻기 위해서 필요한 아웃리거 댐퍼의 감쇠용량을 얻기 위해서는 모멘트비율 5%의 값을 식 (14)에 넣고 계산하면 된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 전통적인 아웃리거 시스템에 추가적인 댐퍼를 설치한 아웃리거 댐퍼시스템의 구조적 특성 및 동적응답 제어성능을 분석하였고 이 시스템의 최적설계를 위하여 다목적 유전자알고리즘의 적용 가능성을 검토하였다. 이를 위하여 아웃리거 댐퍼시스템이 적용된 고층건물을 단순화한 축소 수치해석모델을 사용하였고 역사지진하중에 대한 동적 특성을 분석하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 아웃리거 댐퍼 및 외곽기둥의 강성의 증가는 지진하중을 받는 고층건물의 동적변위응답을 효과적으로 저감시킬 수 있었지만 가속도응답은 오히려 증가시키는 결과를 가져왔다.
- (2) 아웃리거 댐퍼의 점성감쇠용량 증가를 통하여 변위응답과 가속도응답을 동시에 효과적으로 저감할 수 있음을 확인하였고 점성감쇠용량이 증가할수록 강성의 변화가 구조물의 응답에 미치는 영향이 크게 감소한다는 것을 알 수 있었다.
- (3) 다목적 유전자알고리즘을 아웃리거 댐퍼의 최적설계 과정에 적용함으로써 한 번의 최적화과정을 통하여 다양한 파레토 최적해 설계안을 쉽게 얻을 수 있었다. 이를 통하여 얻은 다수의 설계안 중 적절한 설계안을 엔지니어가 선택할 수 있는 기회를 제공함으로써 매개변수 연구 및 단일목적 최적화에 비하여 설계과정의 효율성을 증대시킬 수 있는 방법으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.
- (4) 본 연구를 통해서 아웃리거 댐퍼시스템이 고층건물의 동적응답을 제어하는데 분명한 효

과가 있다는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 충분한 저감효과를 얻기 위해서는 댐퍼의 용량을 증가시켜야 하는데 이는 경제성이라는 중요한 문제와 연결되어 있기 때문에 추후 아웃리거 댐퍼의 제어성능과 경제성을 동시에 고려한 연구가 필요할 것을 판단된다. 또한 풍응답 제어에 대한 연구도 필요할 것이다.

### 감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2014R1A2A2A01005418).

### References

1. Kim, B.J., Lee, S.H. and Chung, L., "Design of outrigger damper system for wind-induced vibration control of building structures", Journal of the Wind Engineering Institute of Korea, Vol. 15, No. 4, 2011, pp. 163-171.
  2. Kim, D.H. and Chung, K.R., "Evolution of Tall Building Structural System", Review of Architecture and Building Science, 2009, pp. 18-23.
  3. Raj Kiran Nanduri, P.M.B., Suresh, B. and Hussain, I., "Optimum position of outrigger system for high-rise reinforced concrete buildings under wind and earthquake loadings", American Journal of Engineering Research, Vol. 2, No. 8, 2013, pp. 76-89.
  4. Herath, N., Haritos, N., Ngo, T. and Mendis, P., "Behaviour of outrigger beams in high rise buildings under earthquake loads", Australian Earthquake Engineering Society 2009 Conference, 2009.
  5. Smith, R and Willford, M., "Damped outriggers for tall buildings", The Arup Journal 3/2008, pp. 15-21.
  6. Smith, R and Willford, M., "The damped outrigger concept for tall buildings", The Structural Design of Tall and Special Buildings, Vol. 16, 2007, pp. 501-517.
  7. Kim, D.Y., "Application of outrigger dampers to songdo NEATT", Spring Conference of The Korea Institute of Building Construction, Vol. 10, No. 1, 2010, pp. 69-74.
  8. Chen, Y., McFarland, D.M., Wang, Z. Spencer Jr., B.F. and Bergman, L.A., "Analysis of tall buildings with damped outriggers", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 136, No. 11, 2010, pp. 1435-1443.
  9. Fonseca, C.M. and Fleming, P.J., "Genetic algorithms for multiobjective optimization: Formulation, discussion and generalization", Genetic Algorithms: Proceedings of the Fifth International Conference, Morgan Kaufmann, San Mateo, CA, 1993, pp. 416-423.
  10. Deb, K., Pratap, A., Agrwal, S. and Meyarivan, T., "A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II", IEEE Transaction on Evolutionary Computation, Vol. 6, No. 2, 2002, pp. 181-197.
  11. Lee, J.H., "Determination of urban watershed boundary and optimal design of sewer networks using multi-objective optimal technique", Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 12, No. 2, 2012, pp. 303-307.
  12. Kim, H.S., Kang, J.W. and Kim, Y.S., "Smart microvibration control of high-tech Industry facilities using multi-objective genetic algorithm", Journal of the Korean Association for Spacial Structures, Vol. 13, No. 2, 2013, pp. 37-45.
- Received : November 07, 2014
  - Revised : November 19, 2014
  - Accepted : November 19, 2014